

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra telekomunikační techniky



TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra telekomunikační techniky

OPTIMALIZACE VYUŽITÍ VÍCE CEST KE ZVÝŠENÍ ROBUSTNOSTI PŘENOSU DAT

Ing. Petr Chlumský

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Telekomunikační technika

Teze disertace k získání akademického titulu „doktor“, ve zkratce „Ph.D.“

Praha, Zář 2014

Summary

This doctoral thesis deals with optimization of the use of multiple transmission paths in order to increase robustness of data transmission. The essence of the research is the transmission scheme proposal which uses principles from the network coding field to achieve the possibility of erroneous data reconstruction. With a particular method of data combining and using specific decoder logic, the proposed scheme is able to recover some erroneous data without any retransmissions. The scheme is designed as end-to-end and is fully transparent, independent on the intermediate communication nodes. The proposed scheme was implemented and tested by simulation framework OMNeT++. The evaluation of the scheme in terms of robustness and delay is part of the thesis as well as the comparison with other multipath data transmission schemes.

Resumé

Tato disertační práce se zabývá optimalizací využití více přenosových cest za účelem navýšení robustnosti přenosu dat. Podstata práce je v navrženém schématu přenosu dat, které využívá principy z oblasti síťového kódování pro dosažení možnosti rekonstrukce chybných dat. Pomocí určitého způsobu kombinace dat a pomocí specifické logiky dekodéru je možné obnovit na přijímací straně jistou část chybně doručených dat bez použití retransmise. Navržené schéma pracuje mezi koncovými body komunikace a je plně transparentní, nezávislé na mezilehlých bodech komunikace. Navržené schéma bylo implementováno a otestováno pomocí simulačního nástroje OMNeT++. Součástí práce je vyhodnocení z pohledu robustnosti a zpoždění přenosu dat a také porovnání vůči dalším schématům přenosu, která využívají více přenosových cest.

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na katedře Telekomunikační techniky Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: Ing. Petr Chlumský
Katedra telekomunikační techniky
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze
Technická 2, 166 27 Praha 6, Česká republika
petr.chlumsky@fel.cvut.cz

Školitel: doc. Ing. Jiří Vodrážka, Ph.D.
Katedra telekomunikační techniky
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze
Technická 2, 166 27 Praha 6, Česká republika
vodrazka@fel.cvut.cz

Oponenti: _____

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Telekomunikační technika v zasedací místnosti č Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možné se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

.....
předseda komise pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru
Telekomunikační technika
Katedra telekomunikační techniky
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze
Technická 2, 166 27 Praha 6, Česká republika

1 Aktuální stav řešení problematiky

Existují různé způsoby jak přistupovat k problému minimalizace množství přenosových chyb, které lze v určitých případech i vhodně kombinovat. K rozdělení jednotlivých technik zabezpečení přenosu dat proti chybám lze přistoupit z pohledu jednotlivých vrstev RM OSI (Reference Model Open Systems Interconnection) [L1]. Na fyzické vrstvě se využívají základní techniky jako dopředná korekce chyb, prokládání a další [L2]. Do této vrstvy patří i diverzifikační technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), která v případě využití rádiových přenosových cest využívá vícecestné šíření signálu pomocí dvou a více antén na vysílací i přijímací straně bezdrátové komunikace. Tato technologie využívá dva zásadní principy: prostorová diverzita (snižuje pravděpodobnost chyby přenosu) a prostorovou multiplexaci (zvyšuje přenosovou rychlost) [L3][L4]. Jako příklad optimalizačních technik mezi fyzickou a spojitou vrstvou lze zmínit dynamické přiřazování subnosných OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [L5], či potlačení interferencí u bezdrátových sítí se smíšenou topologií [L6].

Spojivá vrstva, jakožto vrstva zaručující spolehlivé spojení mezi sousedními body, respektive její podvrstva LLC (Logical Link Control), je místem speciálně určeným pro kontrolu a případnou opravu chyb [L7]. Optimalizace na spojitou vrstvě jsou obvykle založeny na určitém druhu přizpůsobení ve snaze upravit parametry použitého protokolu vzhledem k aktuálnímu stavu sítě [L8], nebo na úpravě plánovacího mechanismu [L9][L10]. Objevují se také projekty přidávající funkcionalitu mezi vrstvy spojitou a síťovou, jako například zajímavý projekt COPE [L11]. COPE architektura vylepšuje propustnost pomocí implementace nové podvrstvy mezi spojitou a síťovou vrstvou, která využívá všesměrové podstaty vysílání na bezdrátovém médiu. Ta umožňuje sousedním bodům komunikace zaslechnout paket, který je vysílán, což umožňuje dříve zkompletovat přenášený objem dat.

Síťová vrstva není běžně pro zabezpečení přenosu používána. Různé práce zaměřené na optimalizaci na síťové vrstvě zahrnují nové směrovací metody, jako je například rozprostřené směrování [L12]. Právě na tuto vrstvu se zaměřuje tato disertační práce, jakožto na místo s potenciálem přínosu vyšší odolnosti přenosu. Vzhledem k nezávislosti jednotlivých vrstev bude stále možné využívat i další bezpečnostní metody, tedy kanálové kódování nižších vrstev a opravné mechanismy vyšších vrstev.

Transportní vrstva zajišťuje doručování celých bloků dat a zajišťuje kontrolu, opravu chyb i doručování dat ve správném pořadí. Jejím hlavním mecha-

Seznam aplikovaných výsledků

1. Z. Kocur, P. Chlumský, and M. Kozák, “Vícekanálový paketový procesor,” 2012. Funkční vzorek — 33% podíl autora na výsledku

Ostatní publikace

Seznam impaktovaných publikací

1. T. Hégr, L. Boháč, Z. Kocur, M. Vozňák, and P. Chlumský, “Methodology of the Direct Measurement of the Switching Latency,” *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. 89, no. 7, pp. 59–63, 2013 — 20% podíl autora na článku, IF v době přijetí k publikování

Seznam publikací v recenzovaných časopisech

1. P. Chlumský and B. Huerta, “Measurement on the wireless technology based on the ieee 802.16 standard and possibility of its simulation,” — 50% podíl autora na článku, v recenzním řízení
2. T. Hégr, L. Boháč, V. Uhlíř, and P. Chlumský, “OpenFlow Deployment and Concept Analysis,” *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 11, no. 5, pp. 327–335, 2013 — 25% podíl autora na článku

Seznam konferenčních příspěvků

1. V. Machula, Z. Kocur, and P. Chlumský, “Filtering Methods of the Inertial Position Measuring System,” in *Proceedings of the 2011 International Conference on Telecommunication Systems Management*, (Dallas, TX), pp. 35–38, American Telecommunications Systems Management Association Inc., 2011 — 33% podíl autora na příspěvku

Ohlasy na publikace a citace mi nejsou známy.

2. Z. Kocur, P. Macejko, P. Chlumský, J. Vodrážka, and O. Vondrouš, “Adaptable System Increasing the Transmission Speed and Reliability in Packet Network by Optimizing Delay,” *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 13–19, 2014 — bude vydán v roce 2014, 20% podíl autora na článku
3. P. Chlumský, Z. Kocur, J. Vodrážka, and T. Kořínek, “Reduction of packet loss by optimizing the antenna system and layer 3 coding,” vol. 12, no. 4, 2014 — bude vydán v roce 2014, 25% podíl autora na článku
4. P. Chlumský, Z. Kocur, and J. Vodrážka, “Comparison of Different Scenarios for Path Diversity Packet Wireless Networks,” *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 199–203, 2012 — 33% podíl autora na článku
5. P. Chlumský, Z. Kocur, and J. Vodrážka, “Comparison Methodology of the Simulation Models Based on the IEEE 802.11 Standard,” *Elektrorevue*, vol. 3, no. 1, pp. 32–38, 2012 — 33% podíl autora na článku

Seznam konferenčních příspěvků

1. P. Chlumský and J. Vodrážka, “Delay Analysis of Data Transmission System with Channel Coding,” in *Proceedings of 10th International Conference ELEKTRO 2014*, pp. 31–35, Žilinská univerzita, 2014 — 50% podíl autora na příspěvku
2. Z. Kocur, P. Chlumský, P. Macejko, M. Kozák, L. Vojtěch, and M. Neruda, “Measurement of Mobile Communication Devices on the Testing Railway Ring,” in *15th International Conference on Research in Telecommunication Technologies*, (Bratislava), pp. 34–37, Slovak University of Technology in Bratislava, 2013 — 16% podíl autora na příspěvku
3. P. Chlumský, Z. Kocur, and J. Vodrážka, “Comparison Methodology of the Simulation Models in Wireless Networks,” in *13th International Conference on Research in Telecommunication Technologies 2011*, (Brno), pp. 10–14, VUT v Brně, 2011 — 33% podíl autora na příspěvku
4. P. Chlumský, Z. Kocur, and J. Vodrážka, “The Use of Simulation Framework OMNeT++ in Telecommunications,” in *Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics - KTTO 2010*, (Ostrava), pp. 87–91, VŠB - TUO, 2010 — 33% podíl autora na příspěvku

nismem je opětovné zaslání dat. Spolehlivost doručování je závislá na použitém protokolu. Vyšší vrstvy RM OSI nejsou z pohledu robustnosti přenosu zásadní, možnosti pro realizace dalšího zabezpečení v aplikační vrstvě souvisí vždy s konkrétní aplikací a použité metody zabezpečení tedy nejsou obecně použitelné.

2 Cíle disertační práce

Předložená práce se zabývá optimalizací využití více přenosových cest ke zvýšení spolehlivosti přenosu dat. Navrhuje obecný systém přenosu, který umožňuje variabilní nastavení parametrů jednotlivých komponent systému a vytvořit tak konkrétní, přesně definované schéma přenosu dat.

Stanovené cíle této disertační práce jsou následující:

1. Navrzení obecného systému přenosu umožňujícího variabilní využití více přenosových cest. Návrh a detailní popis funkce konkrétního přenosového schématu schopného zvýšit odolnost přenosu proti chybám při přenosu.
2. Vytvoření modelu navrženého přenosového schématu v síťovém simulačním nástroji. Zvolit konkrétní simulační prostředí a provést úplnou implementaci přenosového schématu pro možnost jeho ověření.
3. Ověření navrženého schématu na simulacích z pohledu schopnosti obnovy chybných dat. Využít naměřená data pro možnost ověření při skutečných provozních podmínkách.
4. Ověření navrženého schématu na simulacích z pohledu z pohledu celkového zpoždění přenosu. Analyzovat vliv mechanismu obnovy dat na navýšení celkového zpoždění přenosu dat.
5. Porovnání navrženého schématu s obecně používanými schématy přenosu dat po více přenosových cestách.

3 Použité metody

Pro ověření teoretických předpokladů navrženého přenosového schématu bylo využito simulace jeho funkcionality. Výběr vhodného nástroje je dán hlavně konkrétními potřebami uživatele. Existují však některé obecné vlastnosti, které by měl podle [L13] každý simulační nástroj obsahovat: *flexibilitu* pro vytváření nových entit modelu. *Usnadnění vývoje* pomocí grafického rozhraní, aby

se uživatel zaměřil na samotnou podstatu problému a ne jeho způsob realizace. Možnost *hierarchického členění* entit a možnost jejich opětovného využití. Umožnění *rychlého běhu simulace* s velkým množstvím simulačních událostí a entit modelu. A v neposlední řadě také *vhodný výstup dat* simulace, pro možnost jejich následné analýzy. To vše splňuje zvolený simulační nástroj OMNeT++, který je v posledních letech v akademickém prostředí hojně využíván.

Simulační prostředí OMNeT++ OMNeT++ je vývojové prostředí, které umožňuje návrh simulací pro široké spektrum oblastí. Lze v něm nasimulovat libovolný systém, jehož funkce jsou zapsatelné pomocí diskretních událostí a který může být rozložen do prvků komunikujících spolu pomocí zpráv. Díky hierarchickému členění a využití objektově orientovaného přístupu jsou vytvořené simulace velmi dobře škálovatelné a jejich rozsah je shora omezen pouze výkoností počítače, na kterém jsou spouštěny. Tvorba simulací je v tomto prostředí velmi pohodlná díky grafickému rozhraní, umožňujícímu snadný a přehledný zápis, a také množství dostupných knihoven již hotových modelů [L14].

Další použité nástroje Pro ověření funkce navrženého přenosového schématu bylo využito měření v mobilních sítích, při kterém bylo využito zařízení pro přenos dat po více paralelních cestách. Zařízení je pod jménem MultiComm vyvíjeno na katedře telekomunikační techniky FEL ČVUT ve spolupráci se společností Certicon [L15].

Generování požadovaného toku dat bylo realizováno pomocí softwarového nástroje FlowPing [L16], který je také vyvíjen na FEL ČVUT. Tento nástroj umožňuje definovat parametry odesílaných dat a také jejich sběr pro následnou analýzu.

Při teoretické analýze bylo využíváno integrované prostředí MATLAB [L17], které v sobě spojuje grafické vývojové prostředí, vlastní programovací jazyk, nebo možnosti vizualizace.

4 Výsledky

4.1 Navržený systém přenosu dat

V této části je nejdříve popsán navržený systém a součásti jeho dvou hlavních částí: kodéru a dekodéru. Systém je obecně definován tak, aby jej bylo možné pomocí parametrů jeho komponent upravit tak, aby odpovídal požadavkům

- [L12] N. Maxemchuk, “Dispersity routing: Past and present,” in *Military Communications Conference, MILCOM 2007. IEEE*, pp. 1–7, 2007.
- [L13] A. Law and M. McComas, “Simulation software for communications networks: the state of the art,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 32, no. 3, pp. 44–50, 1994.
- [L14] A. Varga and R. Hornig, “An overview of the omnet++ simulation environment,” in *Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops, Simutools '08, (ICST, Brussels, Belgium, Belgium)*, pp. 1–10, ICST, 2008.
- [L15] “Software development and testing - certicon.” [online] 2014 [cit. 2014-08-12]. Dostupné z: <http://www.certicon.cz/>.
- [L16] O. Vondrouš, Z. Kocur, P. Macejko, and P. Jareš, “FlowPing - UDP based ping application.” [online] 2014 [cit. 2014-08-12]. Dostupné z: <http://flowping.comtel.cz/>.
- [L17] “Mathworks matlab.” [online] 2014 [cit. 2014-07-10]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.

Publikace vztahující se k tématu disertační práce

Seznam impaktovaných publikací

1. P. Chlumský, Z. Kocur, and V. Machula, “Simulation of the Data Transmission from the Aerobatic Plane,” *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 89, no. 2b/2013, pp. 199–204, 2013 — 33% podíl autora na článku, IF v době přijetí k publikování
2. P. Chlumský and J. Vodrážka, “Innovative two-path data transmission scheme proposal,” — 33% podíl autora na článku, v recenzním řízení

Seznam publikací v recenzovaných časopisech

1. M. Rohlík, P. Chlumský, and T. Vaněk, “Increasing robustness of multi-homed systems in heterogeneous environment,” vol. 12, no. 4, 2014 — bude vydán v roce 2014, 33% podíl autora na článku

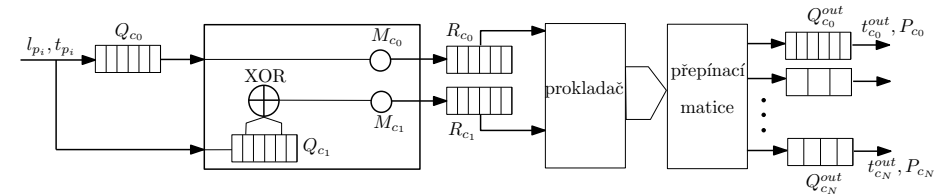
Seznam v tezích použité literatury

- [L1] “Information technology — open systems interconnection — basic reference model: The basic model,” ISO/IEC 7498-1:1994, ISO, Geneva, Switzerland, 1994.
- [L2] I. Glover and P. Grant, *Digital Communications*. Prentice Hall, 2010.
- [L3] D. Gesbert, M. Shafi, D.-s. Shiu, P. Smith, and A. Naguib, “From theory to practice: an overview of mimo space-time coded wireless systems,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, pp. 281–302, 2003.
- [L4] A. Lozano and N. Jindal, “Transmit diversity vs. spatial multiplexing in modern mimo systems,” vol. 9, no. 1, pp. 186–197, 2010.
- [L5] G. Song and Y. Li, “Cross-layer optimization for ofdm wireless networks-part i: Theoretical framework,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 4, no. 2, pp. 614–624, 2005.
- [L6] S. Shabdanov, P. Mitran, and C. Rosenberg, “Cross-layer optimization using advanced physical layer techniques in wireless mesh networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 4, pp. 1622–1631, 2012.
- [L7] B. Forouzan, *Data Communications and Networking*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, Inc., 3 ed., 2003.
- [L8] A. Farago, A. Myers, V. Syrotiuk, and G. Zaruba, “A new approach to mac protocol optimization,” in *Global Telecommunications Conference, 2000. GLOBECOM '00. IEEE*, vol. 3, pp. 1742–1746, 2000.
- [L9] E. Fasolo, M. Rossi, J. Widmer, and M. Zorzi, “On mac scheduling and packet combination strategies for practical random network coding,” in *ICC '07. IEEE International Conference on Communications*, pp. 3582–3589, 2007.
- [L10] Q. Shi and C. Comaniciu, “Cross-layer mac optimization for wireless sensor networks,” *IEEE Sarnoff Symposium*, pp. 1–5, 2008.
- [L11] S. Katti, H. Rahul, W. Hu, D. Katabi, M. Médard, and J. Crowcroft, “Xors in the air: Practical wireless network coding,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 16, no. 3, pp. 497–510, 2008.

služeb nad ním provozovaných. Navržený systém pracuje na třetí vrstvě RM OSI a je plně transparentní, zdrojem dat tedy může být libovolný systém, neboť po dekodování budou data ve stejném formátu, ve kterém do kodéru vstupovala. Dále v textu následuje část, která popisuje jedno specifické schéma přenosu, které vychází z navrženého systému a je určeno pro zajištění vyšší redundance dat. V textu je termín kanál používán ve smyslu obecné datové přenosové cesty, která může procházet přes vícero síťových uzlů. Komunikace v rámci navrženého systému přenosu dat vytváří určité schéma přenosu, podle kterého se pak přenos dat řídí.

4.1.1 Kodér

Na obrázku 1 je zobrazen navržený princip funkce kodéru kanálu, který umožňuje využití více přenosových cest. Pomocí volby jeho parametrů je možné nastavit požadovaný stupeň redundance a optimalizovat jej pro konkrétní možnosti daného přenosového systému.



Obr. 1: Navržený princip funkce kodéru.

Ze zdroje dat tedy do schématu vstupují pakety o délce l_{p_i} s intervalem t_{p_i} . Pakety jsou následně kopírovány do dvou First In, First Out (FIFO) front. Původní (originální) pakety D_i^N jsou ukládány do fronty Q_{c_0} o délce $l_{Q_{c_0}}$. Jejich kopie jsou ukládány do fronty Q_{c_1} o délce $l_{Q_{c_1}}$. Délky těchto front mají vliv na velikost možných kombinací prováděných s pakety za účelem dosažení určité redundance, tyto kombinace mají také vliv na možnosti obnovy ztracených paketů na straně dekodéru. Pro určitá schémata je možná i varianta s nulovými délkami těchto front, tedy přímý průchod paketů. Originální pakety, tedy nijak nekombinované, jsou pak z fronty Q_{c_0} vybírány v intervalu $t_{Q_{c_0}}$, který je dán zvoleným schématem. Blok XOR si z fronty Q_{c_1} odebírá v intervalu $t_{Q_{c_1}}$ potřebný počet paketů, který je dán délkou k zvoleného kódu. Tyto pakety jsou vzájemně kombinovány operací exkluzivní disjunkce, případně jinou lineární funkcí. Pro

možnost dekodování je důležité označení kombinovaných paketů X_j^N tak, aby bylo možné je jednoznačně identifikovat a určit, které pakety byly kombinovány.

Bloky M_{c_0} a M_{c_1} zajišťují multiplikaci paketů; celočíselné hodnoty $\alpha_{M_{c_0}}$ a $\alpha_{M_{c_1}}$ jsou dány navržením schématu a udávají kolikrát je určitý paket nakopírován; platí $\alpha_{M_{c_0,1}} > 0$. Tyto pakety jsou ukládány do registru R_{c_0} (originální pakety) a do registru R_{c_1} (kombinované pakety). Registry jsou zde použity místo FIFO front z toho důvodu, že blok prokladače již může vybírat jednotlivé pakety nejen postupně, podle pořadí, ale podle logiky, dané použitým schématem. Například podle sekvenčních čísel střídavě vybírat každý x -tý paket z R_{c_0} a každý y -tý z R_{c_1} a podobně.

Následující blok zajišťuje prokládání jednotlivých paketů. Hloubka prokladače d je dána délkou shluků chyb, které má být zvolené schéma schopné opravit. Tato volba je také ovlivněna maximální požadovanou dobou zpoždění a také možnostmi technické realizace, jejíž náročnost se různými typy prokladačů liší. Způsob prokládání paketů vybraných z registrů je součástí logiky daného schématu.

Blok přepínací matice $M \times N$ zajišťuje rozdělení paketů z prokladače do front předřazeným N přenosovým cestám. Například může být prvních i cest využito pro posílání originálních paketů a $i + 1$ cesta pro zaslání redundantních dat ve tvaru kombinovaných XOR paketů. Variantou také může být střídavé využívání cest, tedy nikoliv konstantní zaslání určitého druhu paketů (originální, kombinované) po celou dobu přenosu. Pakety jsou z front $Q_{c_0..N}^{out}$ odesílány do N přenosových cest s intervaly $t_{c_0..N}^{out}$. Tyto intervaly mohou být shodné, ale mohou se i lišit. Každý přenosový kanál může mít jiné parametry propustnosti, stejně tak i technologie jednotlivých cest mohou být odlišné (metalické, rádiové, optické). Rozdílná četnost odesílání může vést i v rámci stejného typu cesty k využívání různé modulace a tím i k získání rozdílné pravděpodobnosti ztráty paketu $P_{0..N}$.

4.1.2 Dekodér

Z N kanálů vstupují pakety do dekodéru přes fronty $Q_{d_N}^{in}$, které jsou určeny na vyrovnávání rychlostí. Blok přepínací matice zajišťuje výběr z jednotlivých front podle zvoleného schématu. Výběr je ovlivněn i přenosovými rychlostmi jednotlivých cest a tedy intervaly příchodů paketů $t_{d_N}^{in}$ z jednotlivých kanálů. Blok inverzního prokladače následně zajišťuje zpětné poskládání paketů do původního pořadí. To vyžaduje, v případě nesynchronizovaného doručování paketů z jednotlivých cest, kontrolu sekvenčních čísel paketů. V případě větších odchylek

implementovány i obecně používaná schémata přenosu dat po více cestách. I když existují projekty v oblasti síťového kódování pro zajištění vyšší spolehlivosti dat, nikde dosud nebylo při nejlepším vědomí autora publikováno podobné řešení. Schopnost obnovy chybných či nedoručených paketů a plná transparentnost navrženého schématu pro služby nad ním provozované jsou důležité součásti návrhu.

Součástí práce je i analýza navrženého schématu z pohledu spolehlivosti přenosu a porovnání s běžně používanými schématy přenosu dat po více cestách (inverzní multiplexace, zálohování). Z těchto částí vyplynul jednoznačný přínos navrženého schématu, jako nejrobustnějšího při zachování stejné celkové přenosové rychlosti. Při testování robustnosti přenosu navrženého schématu bylo využito i dat z měření v reálných podmínkách českých mobilních sítí. Byl také zjišťován vliv rozložení výskytu chybných paketů v toku dat na schopnost obnovy chybných paketů. Bylo zjištěno, že navržené schéma je lépe schopno obnovovat chybné pakety, jejichž výskyt na obou přenosových cestách je vzájemně korelovaný, v porovnání se zálohovacím schématem, které využívá obě cesty pro posílání stejných dat.

Dále bylo navržené schéma analyzováno z pohledu přidaného zpoždění přenosu. Toto zpoždění je způsobeno rekonstrukcí chybných paketů a jeho velikost závisí na množství a rozložení v toku dat. U dalších porovnávaných schémat k podobnému nárůstu zpoždění nedochází, velikost celkového zpoždění při jejich použití je tedy vždy nižší, nebo stejná, jako u navrhovaného schématu. V případě, že u schématu zálohování a u inverzní multiplexace je povolena retransmise chybných paketů tak, aby se spolehlivostí přenosu alespoň přiblížily k navrženému schématu, je situace opačná. Zpoždění u nich, vlivem nutnosti opakování přenosu v důsledku chyb, rychle narůstá při zvyšování chybovosti kanálů. Navržené schéma pak vůči nim dosahuje nižších hodnot celkového zpoždění.

Všechny vytyčené cíle byly splněny.

ných podmínkách českých mobilních sítí. Cílem měření bylo získání dat, které by umožnily zajistit v simulačním nástroji reálné chování kanálů v mobilních sítích.

Pro simulaci nekorelovaných chyb kanálů byly využity hodnoty z měření obou kanálů. Hodnota korelačního koeficientu ρ byla v tomto případě 0,067. Hodnota tedy ukazuje na nezávislost výskytu chyb. Tabulka 2 ukazuje paketovou chybovost kanálů z měření použitých v simulaci a výslednou paketovou chybovost schématu v simulaci. Výhoda použití dvou kanálů pro dosažení vyšší robustnosti přenosu je zřejmá. Běžné zálohovací schéma dokázalo snížit chybovost z 0,127 (průměr kanálů) na 0,026, nicméně navržené schéma v tomto případě vykazuje výrazně lepší celkovou paketovou chybovost 0,003. To ukazuje na výskyt jednotlivých chyb.

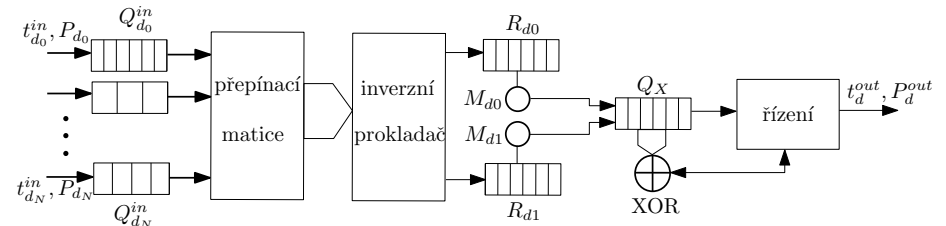
Tab. 2: Výsledky simulací pro nekorelované chyby kanálů

	PER kanálů		Výsledný PER
Navržené schéma	0,135	0,119	0,003
Schéma zálohování	0,135	0,119	0,026

5 Závěrečné shrnutí

Předložená práce se zabývá optimalizací přenosu dat v systémech s více přenosovými cestami ve smyslu zajištění robustnosti přenosu. Toho je dosaženo pomocí navrženého schématu přenosu dat po dvou cestách. Toto schéma je navrženo pro použití na třetí vrstvě modelu OSI, kde zajišťuje spojení typu konec-konec a je nezávislé na mezilehlých bodech komunikace, ale může být využito i na druhé vrstvě (spojení se redukuje na typ bod-bod). Přenos dat pomocí něj je transparentní vůči službám, které jsou přes něj provozovány.

Navržené schéma využívá jednu z cest pro posílání lineární kombinace po sobě jdoucích paketů. Dekódovací část schématu obsahuje specifický algoritmus, pomocí kterého je dosažena možnost obnovy dvou chybně doručených či nedoručených paketů v řadě, a to i v případě chyby korespondujícího paketu v druhé přenosové cestě. Přínos práce spočívá ve způsobu obnovy chybných či vůbec nedoručených dat a v zajištění vyšší robustnosti přenosu. Navržené schéma bylo nejen teoreticky popsáno, ale i kompletně implementováno v simulačním nástroji OMNeT++ pomocí jazyka C++. Pro možnosti přímého porovnání byly



Obr. 2: Navržený princip funkce dekodéru.

od plánovaného pořadí paketů, které může nastat rozdílnými přenosovými drahami jednotlivých cest, rostou nároky na vnitřní paměť a roste zpoždění. Blok dále rozřazuje pakety podle typu (originální, kombinovaný) do dvou registrů $R_{d_{0,1}}$, které obsahují pakety pouze daného typu.

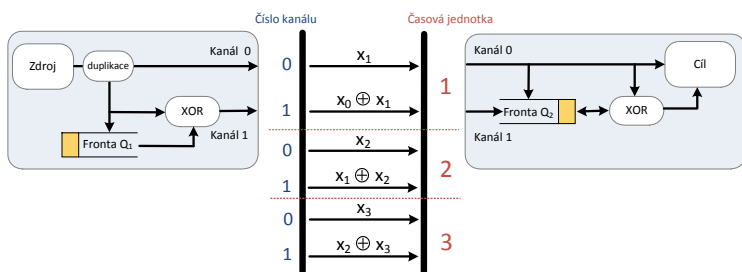
Z těchto registrů si řídicí blok vybírá pakety (do fronty Q_X s délkou l_{Q_X}) a případně je $\alpha_{M_{d_{0,1}}}$ násobně multiplikuje, podle potřeby dekodovacího mechanismu. Některé pakety mohou být pro dekodování využity vícenásobně, proto může schéma využít multiplikaci daného paketu. S touto funkcí souvisí mazání nepotřebných paketů z front. Podle zvoleného schématu k němu může docházet buď přímo logikou daného dekodéru (např. pokud originální paket dorazil, pak je jeho redundantní kopie smazána), nebo po určité zvolené době t_e . Tento čas má vliv na nutnou délku front a i na možnosti obnovy paketu, v případě jeho nedoručení. V případě, že nedochází ke ztrátám paketů, je celá tato část výrazně zjednodušena. Pokud nedochází k výpadkům paketů, pak větev k bloku XOR zůstává nepoužita a řídicí blok zajišťuje poskládání paketů do pořadí, v jakém byly odeslány. Pro určité protokoly vyšších vrstev, které si zajišťují správné pořadí samy (např. TCP), mohou být pakety zasílány i přímo. Skládáním paketů do pořadí má vliv na zpoždění doručení paketů, na kolísání zpoždění i na ztrátovost. V případě, že paket nebude doručen a ani se nepovede jeho obnova (do určité přednastavené doby čekání t_s), je nutné pokračovat v odesílání paketů dále. Tento časový limit je dán požadavkem služby (služeb), které budou přes přenosové schéma provozovány. V případě služeb citlivých na zpoždění (hlasové služby), bude mít tento limit hodnotu nižší, než u méně časově závislých služeb (datové služby). S vysokými požadavky na tento limit může docházet ke ztrátám paketů, které se zpozdily buď v přenosové cestě, nebo doba jejich obnovy (v případě ztráty paketu) překročila daný limit. Řídicí blok může pomocí vnitřní paměti zajišťovat vyrovnávání intervalů mezi doručovanými pakety a

tím potlačovat kolísání zpoždění způsobené přenosovými cestami i vnitřní logikou dekodéru. Výstupem z dekodéru jsou pakety odcházející v intervalech t_d^{out} s celkovou chybovostí přenosu mezi vstupem kodéru a výstupem dekodéru P_d^{out} . Pakety odcházejí v původní podobě v jaké vstupovaly do kodéru na vzdálené straně přenosu.

4.2 Specifický systém přenosu

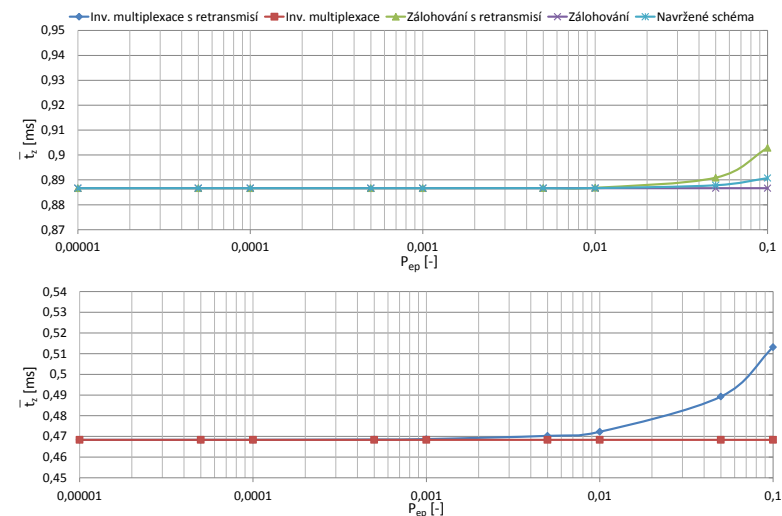
Z obecného návrhu systému přenosu je dále odvozena jeho konkrétní realizace. Vybraná varianta se vyznačuje schopností obnovy až dvou po sobě jdoucích originálních paketů (tj. nepozměněných), bez potřeby opětovného zaslání dat. Navržené schéma využívá dvou přenosových cest a operaci exkluzivní disjunkce (XOR) pro manipulaci s daty paketů z různých přenosových cest.

Na obrázku 3 je zobrazen princip funkce navrženého schématu přenosu dat. Na levé straně obrázku 3 je část zajišťující odeslání dat, na pravé pak část starající se o příjem dat. Paket doručený do systému s navrženým schématem je na vstupu zduplikován. Původní paket je odeslán pomocí přenosového kanálu 0, který je používán pouze pro odesílání originálních paketů. Duplikát paketu je nakombinován pomocí binární funkce XOR s paketem uloženým ve frontě Q_1 , tato kombinace je odeslána druhým kanálem. Druhý kanál je navržen jako redundantní a je využíván pouze pro zaslání kombinace dvou po sobě jdoucích paketů. Paket ve frontě (duplikát z předchozí iterace) je nahrazen aktuálním. Tímto průběžným systémem je zaručena fronta o délce pouze dvou po sobě jdoucích paketů. V případě odesílání úvodního paketu komunikace, je paket kombinován s nulovým paketem (fronta je prázdná), což díky vlastnostem operace XOR znamená, že je oběma kanály poslán stejný paket.



Obr. 3: Princip funkce navrženého schématu přenosu dat.

Toto navýšení je dáno vyšším počtem více komplexnějších variant obnovy paketů. Zálohovací schéma s povoleným opakováním přenosu nedoručených paketů vykázalo téměř dvouprocentní nárůst průměrné doby zpoždění paketů při paketové chybovosti kanálů na hodnotě 0,1. Tento nárůst, s počátkem při chybovosti kanálů 0,01, je způsoben delším časem, který je nutný v případě nedoručení paketu a čekání na jeho opětovné zaslání.



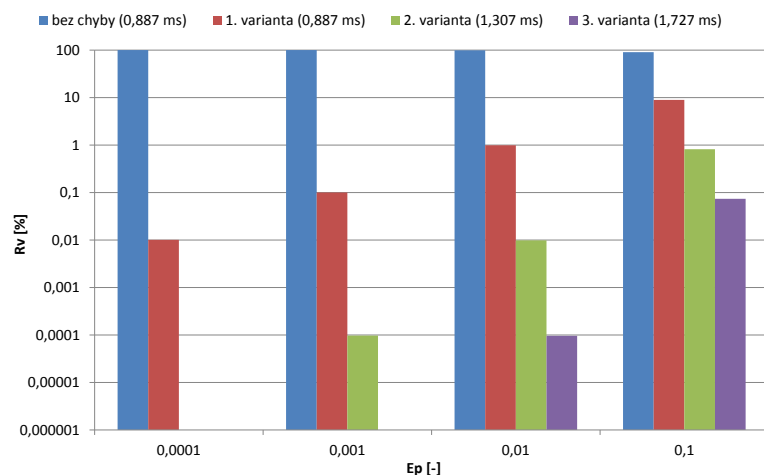
Obr. 5: Porovnání průměrného přenosového zpoždění pro paketovou chybovost kanálů od 10^{-5} do 10^{-1} .

Zmíněný nárůst, nicméně mnohem větší, je zobrazen na spodní části obrázku 5. Schéma inverzního multiplexu s povoleným znovuzasláním nedoručených paketů vykazuje nejrychlejší nárůst zpoždění jako důsledek nejnižší robustnosti mezi testovanými schématy přenosu. Průměrné zpoždění paketů bylo počítáno pouze z doručených paketů, v opačném případě by zpoždění rostlo do nekonečna.

4.5 Ověření navrženého schématu na naměřených datech

Pro další ověření chování navrženého přenosového schématu bylo provedeno měření pro získání parametrů zpoždění přenosu dat a paketové chybovosti v reál-

Rozložení četnosti výskytu chybných paketů pro tři varianty obnovy navrženého schématu a četnost výskytu korektně doručených paketů je ukázána na obrázku 4. Graf zobrazuje výsledky čtyř simulací schématu, jednotlivé simulace se lišily nastavenou paketovou chybovostí přenosových kanálů 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} a 10^{-1} . Na svislé ose je vyneseno procentuální poměr paketů spadajících do dané varianty obnovy vůči všem doručeným paketům R_p . Část grafu pro chybovost 10^{-4} obsahuje pouze dva sloupce v důsledku nižší hodnoty chybovosti. A to sloupec pro pakety doručené bez chyby a pro první variantu obnovy. Situace pro druhou a třetí variantu (tedy více než jeden nedoručený paket v řadě) během simulace nenastala. Simulace pro vyšší chybovosti kanálů již ukazují, jak četné



Obr. 4: Průměrné hodnoty zpoždění přenosu a jeho rozložení u navrženého schématu pro různé paketové chybovosti přenosových kanálů.

byly jednotlivé varianty obnovy. Navíc se s vyšší chybovostí přenosových kanálů zvyšuje průměrné zpoždění paketů. To je dáno častějším výskytem více časově náročných variant obnovy. Hodnoty průměrného zpoždění pro danou variantu obnovy jsou součástí legendy grafu.

Na obrázku 5 jsou dva grafy ukazující průběh průměrné hodnoty zpoždění v závislosti na paketové chybovosti přenosových kanálů pro porovnání různých schémat přenosu. Navržené schéma vykazuje malé navýšení zpoždění o 0,5 % při nejvyšší simulované chybovosti kanálů vůči zpoždění při nízkých chybovostech.

Pokud paket z kanálu 0 není korektně doručen (přijímací strana nedokáže přečíst celý obsah přenášených dat paketu) je zde stále šance k obnovení daného paketu. Na rozdíl od schématu využívajícího obou kanálů pro posílání stejných dat (úplná redundance dat), je navržené schéma schopno obnovit původní nedoručený paket obnovit i v situaci, kdy není doručen ani redundantní paket z druhého kanálu a to bez opakování přenosu dat. Následující odstavce popisují princip obnovy nedoručených paketů v přijímací části rozdělené podle možných kombinací nedoručených paketů.

4.2.1 Varianta obnovy

Jedna z možných variant obnovy, popsaných v disertační práci, nastává při nedoručení dvou originálních paketů a jednoho redundantního. Navržené schéma je schopné rekonstrukce obou nedoručených originálních paketů. Pro úspěšnou obnovu je potřeba přijmout jeden redundantní paket k ztracenému originálu a úspěšně přijmout následující dvojici paketů (originální i redundantní). Princip funkce obnovy je v zachování informace z redundantního kanálu a vhodného použití operace XOR. Funkci lze demonstrovat při pohledu na obrázek 3 a rovnici 1, která naznačuje příklad použití.

$$\begin{aligned}
 x_1, x_0 \oplus x_1, x_2 \dots \text{nedoručeny} \\
 x_3 \oplus (x_2 \oplus x_3) \Rightarrow x_2 \\
 x_2 \oplus (x_1 \oplus x_2) \Rightarrow x_1
 \end{aligned} \tag{1}$$

V případě ztráty paketů x_1 , $x_0 \oplus x_1$ a x_2 , jsou následující pakety $x_1 \oplus x_2$ a x_3 uloženy ve frontě Q_2 . V momentě doručení paketu $x_2 \oplus x_3$ je možné začít s obnovou nedoručených originálních paketů. Z XOR operace paketu x_3 a jemu odpovídajícího redundantního paketu $x_2 \oplus x_3$ se získá nedoručený paket x_2 . Ten je zaslán příjemci a jeho duplikát je použit pro další XOR operaci s paketem $x_1 \oplus x_2$ uloženým ve frontě. Tím je získán první nedoručený paket (x_1). Nedoručené redundantní pakety není potřeba obnovovat, jelikož originální pakety doručily kompletní informaci k příjemci.

4.3 Analýza z pohledu chybovosti dat

Pro možnost porovnání navrženého systému přenosu z pohledu chybovosti dat je potřeba zvolit referenční systémy, vůči kterým je možné vztahovat výsledky

analýzy. Níže popsané metody jsou často využívány k využití více přenosových kanálů.

Přenosový systém inverzní multiplexace Přenosový systém rovnoměrně rozděluje přenášená data do dvou nezávislých kanálů. Princip je založen na předpokladu, že když každý z paralelních datových kanálů bude přenášet pouze polovinu z celkového objemu dat, tak bude možné použít pro jednotlivé kanály nižší přenosovou rychlost a tím i robustnější modulaci, která zajistí nižší chybovost přenosu dat. Celková přenosová rychlost bude v takovém případě přibližně stejná, jako u systému s jedním přenosovým kanálem.

Přenosový systém zálohování Systém se zrcadlením dat využívá situaci, kdy oba paralelní přenosové kanály přenášejí zcela stejná data. Zde je nutné použít méně odolné modulační schéma v porovnání s předchozím systémem tak, aby celková propustnost dat byla stejná.

4.3.1 Paketová chybovost pro chyby vznikající v souvislosti s interferencemi

Tato část se zabývá tím, které ze schémat je více odolné vůči chybám přenosových kanálů dané interferencemi signálu na médiu. Pravděpodobnost chyby paketu je vyšší u systému inverzního multiplexu, stačí totiž, aby chyba nastala na jednom z kanálů a paket nemůže být korektně doručen. Zajímá nás totiž celková chybovost systému. Naopak pokud dojde k chybě na jednom z kanálů u systému zálohování, je stále možné, že paket bude doručen druhým kanálem. Tento rozdílný přístup je možné popsat následujícími rovnicemi z pohledu pravděpodobnostního za předpokladu, že paket je považován za chybný, pokud chyba nastane i v jediném jeho bitu.

Pravděpodobnost, že chyba nastane v intervalu délky paketu l_p u systému inverzního multiplexu:

$$P_m = [1 - (1 - p_0)^{l_p}] + [1 - (1 - p_1)^{l_p}] - [1 - (1 - p_0)^{l_p}] \cdot [1 - (1 - p_1)^{l_p}]. \quad (2)$$

Pravděpodobnost, že chyba nastane v intervalu délky paketu l_p u systému zálohování:

$$P_z = [1 - (1 - p_0)^{l_p}] \cdot [1 - (1 - p_1)^{l_p}]. \quad (3)$$

Kde p_0 and p_1 jsou pravděpodobnosti chyby v jednom bitu.

4.3.2 Porovnání obecných metod s navrženým systémem přenosu

Navržený přenosový systém, znázorněný na obrázku 3 v minulé kapitole, je možné popsat pomocí pravděpodobnosti P_r , která udává, jak je pravděpodobné, že všechny originální (nekombinované) pakety dorazí do cíle bez chyby. Ať r značí počet originálních paketů a p_0 , p_1 značí pravděpodobnost chyby paketu na kanálu 0 a 1, pak:

$$P_r = [(1 - p_0)(1 - p_1) + p_0(1 - p_1) + p_1(1 - p_0)]^r \quad (4)$$

Jelikož navržený systém přenosu zasílá data v obou kanálech paralelně, je potřeba využít méně odolnou modulaci pro zachování stejné celkové přenosové rychlosti jako u systému inverzního multiplexu. Pro potřeby porovnání navrženého systému s výše popsanými systémy bude tedy využívat modulaci 16-QAM, stejně jako zálohovací systém. Pravděpodobnost chyby je pro oba kanály stejná: $p_0 = p_1 = 0,058987$. Pro systém inverzního multiplexu vychází díky modulaci QPSK chybovost kanálů $p_0 = p_1 = 0,0007827$.

Tabulka 1 ukazuje výsledky simulace v prostředí OMNeT++, jak je vidět, navržený systém dosáhl nejnižší celkové paketové pravděpodobnosti chyby. Přestože systém inverzního multiplexu měl pravděpodobnost chyby v jednotlivých kanálech 75,36 krát nižší, přesto je jeho výsledek třikrát horší oproti navrženému systému. To je dáno hlavně schopností opravy a redundancí obsaženou v druhém přenosovém kanálu systému. Zálohovací systém, přestože obsahuje plnou redundanci v druhém kanálu, vykázal kvůli nižší odolnosti modulace nejhorší výsledek.

Tab. 1: Výsledky simulace

Název systému	Inv. multiplex	Zálohování	Navržený systém
Chybovost	0,000757	0,003509	0,000247
Konfidenční interval	8,478e-7	8,059e-7	4,100e-7

4.4 Analýza z pohledu zpoždění přenosu

Tato část se zabývá vlivem navrženého přenosového schématu na zpoždění přenosu dat. Důležitou charakteristikou přenosového schématu je průměrné přidané zpoždění paketů dané algoritmem korekce chybných dat.